

PCTWELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales BüroINTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

| | | |
|--|-----------|---|
| (51) Internationale Patentklassifikation ⁷ : G06F 17/00 | A2 | (11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 00/33209 (43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 8. Juni 2000 (08.06.00) |
| (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE99/03820 (22) Internationales Anmeldedatum: 1. Dezember 1999 (01.12.99) (30) Prioritätsdaten: 198 55 876.7 3. Dezember 1998 (03.12.98) DE (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, D-80333 München (DE). (72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): SCHÄFFLER, Stefan [DE/DE]; Paul-Lincke-Strasse 15, D-86199 Augsburg (DE). STURM, Thomas [DE/DE]; Schlüsselbergstrasse 16, D-81673 München (DE). (74) Gemeinsamer Vertreter: SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT; Postfach 22 16 34, D-80506 München (DE). | | (81) Bestimmungsstaaten: US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE). Veröffentlicht <i>Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.</i> |
| (54) Title: METHOD AND DEVICE FOR DESIGNING A TECHNICAL SYSTEM (54) Bezeichnung: VERFAHREN UND ANORDNUNG ZUM ENTWURF EINES TECHNISCHEN SYSTEMS (57) Abstract <p>The invention relates to a method for designing a technical system in which measurement data of a predetermined system is described using a substitute model. To this end, a dimension figure is determined for the quality of the substitute model by comparing the measurement data of the system with data determined by the substitute model. The substitute model is adapted with regard to a highest possible quality by using the dimension figure determined for the quality. The dimension figure is improved using additional measurement data and the adapted substitute model is used to design the technical system.</p> (57) Zusammenfassung <p>Es wird ein Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems angegeben, bei dem Meßdaten eines vorgegebenen Systems anhand eines Ersatzmodells beschrieben werden. Dabei wird eine Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells ermittelt, indem die Meßdaten des Systems mit durch das Ersatzmodell bestimmten Daten verglichen werden. Anhand der Maßzahl für die Güte wird das Ersatzmodell im Hinblick auf eine möglichst hohe Güte angepaßt. Die Maßzahl wird anhand von zusätzlichen Meßdaten verbessert und das angepaßte Ersatzmodell wird zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt.</p> | | |

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

| | | | | | | | |
|----|------------------------------|----|-----------------------------------|----|---|----|--------------------------------|
| AL | Albanien | ES | Spanien | LS | Lesotho | SI | Slowenien |
| AM | Armenien | FI | Finnland | LT | Litauen | SK | Slowakei |
| AT | Österreich | FR | Frankreich | LU | Luxemburg | SN | Senegal |
| AU | Australien | GA | Gabun | LV | Lettland | SZ | Swasiland |
| AZ | Aserbaidshon | GB | Vereinigtes Königreich | MC | Monaco | TD | Tschad |
| BA | Bosnien-Herzegowina | GE | Georgien | MD | Republik Moldau | TG | Togo |
| BB | Barbados | GH | Ghana | MG | Madagaskar | TJ | Tadschikistan |
| BE | Belgien | GN | Guinea | MK | Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien | TM | Turkmenistan |
| BF | Burkina Faso | GR | Griechenland | | | TR | Türkei |
| BG | Bulgarien | HU | Ungarn | ML | Mali | TT | Trinidad und Tobago |
| BJ | Benin | IE | Irland | MN | Mongolei | UA | Ukraine |
| BR | Brasilien | IL | Israel | MR | Mauretanien | UG | Uganda |
| BY | Belarus | IS | Island | MW | Malawi | US | Vereinigte Staaten von Amerika |
| CA | Kanada | IT | Italien | MX | Mexiko | UZ | Usbekistan |
| CF | Zentralafrikanische Republik | JP | Japan | NE | Niger | VN | Vietnam |
| CG | Kongo | KE | Kenia | NL | Niederlande | YU | Jugoslawien |
| CH | Schweiz | KG | Kirgisistan | NO | Norwegen | ZW | Zimbabwe |
| CI | Côte d'Ivoire | KP | Demokratische Volksrepublik Korea | NZ | Neuseeland | | |
| CM | Kamerun | | | PL | Polen | | |
| CN | China | KR | Republik Korea | PT | Portugal | | |
| CU | Kuba | KZ | Kasachstan | RO | Rumänien | | |
| CZ | Tschechische Republik | LC | St. Lucia | RU | Russische Föderation | | |
| DE | Deutschland | LI | Liechtenstein | SD | Sudan | | |
| DK | Dänemark | LK | Sri Lanka | SE | Schweden | | |
| EE | Estland | LR | Liberia | SG | Singapur | | |

Beschreibung**Verfahren und Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems**

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems.

Ein Systemverhalten eines technischen Systems, z.B. einer verfahrenstechnischen Anlage oder eines Systems der
10 Großindustrie, hängt von zahlreichen Parametern ab. Im Rahmen eines Entwurfs solche eines Systems, also insbesondere beim Neuentwurf oder bei der Anpassung bzw. Einstellung eines bereits bestehenden Systems, sind Vorbedingungen, z.B.
15 hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit oder der Umweltbelastung des Systems, einzuhalten. Jede Vorbedingung wird als eine Zielfunktion formuliert, die zu optimieren im Hinblick auf die anderen Zielfunktionen allgemeines Bestreben ist.

Die **Aufgabe** der Erfindung besteht darin, den Entwurf eines
20 technischen Systems anhand von Meßdaten eines vorgegebenen Systems zu ermöglichen, wobei eine gezielte Bestimmung von Meßdaten ein Ersatzmodell dem vorgegebenen System mit hoher Genauigkeit annähert. Gerade im Hinblick auf eine Optimierung des bestehenden Systems bzw. auf einen optimierten Neuentwurf
25 eines Systems ist eine derartige Nutzung bekannter Meßdaten von großer Bedeutung.

Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Weiterbildungen der Erfindung ergeben
30 sich auch aus den abhängigen Ansprüchen.

Zur Lösung der Aufgabe wird ein Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems angegeben, bei dem Meßdaten eines vorgegebenen Systems anhand eines Ersatzmodells beschrieben
35 werden. Es wird eine Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells ermittelt, indem die Meßdaten des vorgegebenen Systems mit durch das Ersatzmodell bestimmten Daten verglichen werden.

Anhand der Maßzahl für die Güte wird das Ersatzmodell dahingehend angepaßt, daß es eine möglichst hohe Güte aufweist. Die Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells wird dadurch verbessert, daß zusätzliche Meßdaten des vorgegebenen Systems ermittelt werden. Das hinsichtlich seiner Güte angepaßte Ersatzmodell wird zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt.

Die aus vielen unterschiedlichen realisierten Systemen vorliegenden Meßdaten werden zur Beschreibung des Ersatzmodells eingesetzt. Mit dem Ersatzmodell wird versucht, das vorgegebene System möglichst gut nachzubilden. Die Maßzahl für die Güte der Nachbildung wird ermittelt, indem die realen Meßdaten mit den Daten, die anhand des Ersatzmodells gewonnen werden, verglichen werden. Eine große Differenz zwischen den Meßdaten und den Daten des Ersatzmodells entspricht einer schlechten Güte, also einer schlechten Abbildung des vorgegebenen Systems in das Ersatzmodell. Durch die Maßzahl für die Güte wird das Ersatzmodell dahingehend angepaßt, daß die Güte selbst möglichst hoch wird und somit das Ersatzmodell das vorgegebene System möglichst gut beschreibt. Gibt es einzelne Meßdaten, die von den Daten des Ersatzmodells besonders abweichen, so werden zusätzliche Meßdaten in einer vorgegebenen Umgebung dieser Meßdaten ermittelt, so daß eine genauere Anpassung (und damit eine weitere Erhöhung der Güte) des Ersatzmodells an das vorgegebene System erfolgen kann. Das so gewonnene Ersatzmodell mit hoher Güte wird zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt.

Unter Entwurf werden allgemein verstanden sowohl der Neuentwurf eines technischen Systems als auch die Anpassung bzw. Adaption eines bereits vorhandenen technischen Systems.

Eine Weiterbildung besteht darin, daß das Ersatzmodell ein Regressionsmodell ist. Das Regressionsmodell geht von der Beschreibung

$$y_i = f_{\beta}(x_i) + e_i$$

aus, wobei

- 5 (y_i, x_i) vorgegebene Wertepaare,
 f_{β} eine Funktion, die von einem Parameter β abhängt
 und
 e_i einen Fehler
bezeichnen.

10

Nun ist der Fehler (als Funktion von β) zu minimieren:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \varphi(\beta).$$

- 15 Geht man von folgendem Beispiel

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + e$$

- 20 aus, so ist der funktionale Zusammenhang quadratischer
Ordnung, das Regressionsmodell (Funktion, abhängig von β)
hingegen ist linear.

- 25 Eine zusätzliche Erhöhung der Güte des Ersatzmodells wird
dadurch erreicht, daß mindestens ein Teilbereich des
Ersatzmodells lokal angepaßt wird. Hierbei erfolgt eine
Anpassung des Ersatzmodells durch zusätzliche (lokale)
Ermittlung von Meßwerten, die zur genaueren Anpassung des
Ersatzmodells an das vorgegebene System herangezogen werden.

- 30 Die Güte kann in einer anderen Weiterbildung anhand einer
quadratischen Abweichung der Meßdaten von den durch das
Ersatzmodell bestimmten Daten ermittelt werden. Die Anpassung
des Ersatzmodells erfolgt durch Minimierung der quadratischen
Abweichung.

35

Eine Ausgestaltung besteht darin, daß die Meßdaten nach ihrer Güte, bezogen auf deren Abweichung von den durch das Ersatzmodell bestimmten Daten, sortiert werden und eine vorgegebene Anzahl von $n\%$ schlechtesten Meßdaten aussortiert werden. Es wird also eine Güte für jedes Meßdatum bestimmt, wobei die Menge der Meßdaten, vorzugsweise in Form einer Liste, nach ihrer Güte sortiert und die $n\%$ schlechtesten bzw. die n schlechtesten Meßdaten aussortiert werden. Insbesondere ist zu prüfen, ob die $n\%$ bzw. die n schlechtesten Meßdaten in einem zusammenhängenden Bereich liegen. Ist dies der Fall, so werden diese Meßdaten nicht aussortiert, da sie mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Meßfehler, sondern einen zusammenhängenden Bereich bestimmen, der durch das Ersatzmodell nicht ausreichend genau abgebildet wurde.

Eine andere Weiterbildung besteht darin, daß die Meßdaten einer Vorverarbeitung unterzogen werden. Da in einem realen vorgegebenes System eine große Menge an Meßdaten pro Zeiteinheit anfallen, ist es sinnvoll, diese Meßdaten einer Vorverarbeitung zu unterziehen und somit zu gewährleisten, daß weitgehend signifikante Meßdaten in die Bildung des Ersatzmodells einfließen. Bevorzugt findet die Vorverarbeitung in einer Reduktion der Anzahl von Meßdaten ihre Ausprägung.

Dabei werden die Meßdaten entsprechend vorgegebener Kriterien in Klassen eingeteilt. Die Meßwerte einer Klasse werden bewertet und diejenigen Meßwerte, deren Bewertung unterhalb eines vorgegebenen ersten Schwellwertes liegt, werden aussortiert. Durch die Aussortierung der Meßwerte ergibt sich eine Reduktion hinsichtlich der Anzahl der Meßwerte. Somit liegen für eine Weiterverarbeitung eine deutlich reduzierte Anzahl von Meßwerten vor. Die Weiterverarbeitung kann mit gegenüber der nicht reduzierten Anzahl von Meßwerten geringerem Rechenaufwand erfolgen.

Auch können die Klassen selbst bewertet werden. Insbesondere kann eine Klasse, deren Bewertung unterhalb eines vorgegebenen zweiten Schwellwerts liegt, aussortiert werden. Hierdurch ergibt sich eine zusätzliche Reduktion der Anzahl der Meßwerte.

Eine andere Weiterbildung der Vorverarbeitung besteht darin, daß ein Kriterium für die Klasseneinteilung darin besteht, daß pro Klasse Meßwerte zu einer Vorgabe von Einstellparametern des technischen Systems bestimmt werden. Typischerweise wird das technische System anhand einer vorgegebenen Anzahl von Einstellparametern eingestellt, nach Einstellung erfolgt eine (zumeist zeitverzögerte) Reaktion des Systems auf die Einstellparameter (Einschwingverhalten, Einschwingvorgang des Systems) Nach Einstellung werden somit eine bestimmte Menge an Meßwerten aufgenommen, die dem Einschwingvorgang zugeordnet werden können, wobei nach abgeschlossenem Einschwingvorgang (Übergang in den stationären Betrieb) weiterhin Meßwerte anfallen, die dem vorgegebenen Satz Einstellparameter zugeordnet werden. Durch Verstellung der Einstellparameter wird eine neue Klasse bestimmt. Alle Meßwerte, die jeweils nach einer Verstellung der Einstellparameter anfallen, gehören in eine eigene Klasse.

Zusätzlich können Meßwerte einer Klasse, die dem jeweiligen Einschwingvorgang zuordenbar sind, aussortiert werden. Weiterhin können fehlerhafte Meßwerte aussortiert werden. Die Einstellung großer technischer Systeme ist in vielen Fällen auf eine langfristigen stationären Betrieb ausgerichtet. Meßwerte, die sich auf den Einschwingvorgang (von kurzer Dauer im Verhältnis zum stationären Betrieb nach abgeschlossenem Einschwingvorgang) beziehen, werden sinnvoll aussortiert, da durch sie Meßwerte für den stationären Betrieb verfälscht werden. Insbesondere im Rahmen einer Modellierung des technischen Systems, sind die Meßdaten des stationären Verhaltens des technischen Systems interessant.

Eine Ausgestaltung besteht darin, die Anzahl der Meßwerte in einer Klasse dadurch zu reduzieren, daß mindestens ein repräsentativer Wert für die Meßwerte der Klasse bestimmt wird. Solch ein repräsentativer Wert kann sein:

- a) ein Mittelwert (z.B. ein gleitender Mittelwert) der Meßwerte der Klasse,
- b) ein Maximalwert der Meßwerte der Klasse,
- c) ein Minimalwert der Meßwerte der Klasse,
- 10 d) ein Median.

Bei Variante d) liegt ein Vorteil darin, daß immer ein Wert bestimmbar ist, den es tatsächlich gibt, wohingegen der Mittelwert a) selbst nicht als Wert vorkommt.

15

Je nach Anwendungsfall, kann eine geeignete Wahl zur Bestimmung des repräsentativen Werts einer Klasse erfolgen.

Eine ganze Klasse mit Meßwerten kann aussortiert werden, wenn diese weniger als eine vorgegebene Anzahl Meßwerte enthält.

20

Eine andere Ausgestaltung besteht darin, daß diejenigen Meßwerte aussortiert werden, die um mehr als einen vorgegebenen Schwellwert von einem vorgebbaren Wert verschieden sind. Der vorgebbare Wert kann ein Mittelwert aller Meßwerte der Klasse oder ein zu erwartender Meßwert auf die jeweiligen Einstellparameter des technischen Systems sein.

25

Im Rahmen einer anderen Weiterbildung werden die mittels Entwurf gewonnenen Daten zur Steuerung einer technischen Anlage eingesetzt. Zusätzlich kann die Steuerung der technischen Anlage zur Laufzeit des Systems, also Online, erfolgen.

30

35

Auch wird zur Lösung der Aufgabe eine Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems angegeben, die eine

Prozessoreinheit aufweist, welche Prozessoreinheit derart eingerichtet ist, daß Meßdaten eines vorgegebenen Systems anhand eines Ersatzmodells beschreibbar sind. Eine Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells ist ermittelbar, indem die
5 Meßdaten des vorgegebenen Systems mit durch das Ersatzmodell bestimmten Daten verglichen werden. Aus der Maßzahl für die Güte ist das Ersatzmodell dahingehend anpaßbar, daß es eine möglichst hohe Güte aufweist. Die Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells ist weiter verbesserbar, indem zusätzlich
10 Meßdaten des vorgegebenen Systems ermittelt werden. Das hinsichtlich seiner Güte angepaßte Ersatzmodell ist zum Entwurf des technischen Systems einsetzbar.

Diese Anordnung ist insbesondere geeignet zur Durchführung
15 des erfindungsgemäßen Verfahrens oder einer seiner vorstehend erläuterten Weiterbildungen.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnung dargestellt und erläutert.

20
Es zeigen

Fig.1 ein Blockdiagramm, das Schritte eines Verfahrens zum Entwurf eines technischen Systems enthält;

25
Fig.2 eine schematische Skizze eines Recovery-Boilers;

Fig.3-5 Eingangsgrößen, Stellgrößen und Ausgangsgrößen des Recovery-Boilers.

30
In **Fig.1** ist ein Blockdiagramm dargestellt, das Schritte eines Verfahrens zum Entwurf eines technischen Systems enthält. In einem Schritt 101 wird anhand von Meßdaten ein Ersatzmodell gebildet. Bevorzugt ist dieses Ersatzmodell ein Regressionsmodell. Dann sind bei einer quadratischen Funktion f die erste und die zweite Ableitung unmittelbar gegeben. Um

das in Schritt 101 entstandene Ersatzmodell auf die Meßdaten anzupassen, also eine Verfeinerung des Ersatzmodells vorzunehmen, so daß die Meßdaten das Ersatzmodell in ausreichender Näherung beschreiben, wird in einem Schritt 102 eine Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells bestimmt. Diese Maßzahl wird bestimmt, indem die Meßdaten des vorgegebenen Systems mit durch das Ersatzmodell bestimmten Daten verglichen werden. Bevorzugt erhält jedes Meßdatum eine Maßzahl für die Güte, welche Maßzahl die Abweichung des Meßdatums mit dem zugehörigen von dem Ersatzmodell bestimmten Wert kennzeichnet. Die Summe aller Maßzahlen für die Güte für alle Meßdaten bestimmt eine Gesamtgüte für das Ersatzmodell. In einem Schritt 103 wird die Güte maximiert, indem die Maßzahl für die Güte maximiert wird. Zusätzlich wird das Ersatzmodell verfeinert, also die Güte der Übereinstimmung des Ersatzmodells mit dem vorgegebenen System erhöht, indem gezielt Meßdaten an den Stellen bestimmt werden und in die Bildung des Ersatzmodells einfließen, an denen eine große Abweichung zwischen Meßdaten und durch das Ersatzmodell bestimmten Daten besteht. Ist eine entsprechend hohe Güte für das Ersatzmodell bestimmt, so wird in einem Schritt 104 dieses Ersatzmodell für den Entwurf des technischen Systems eingesetzt. Der Entwurf kann sowohl ein Neuentwurf (vgl. Schritt 105) oder eine Anpassung eines schon bestehenden technischen Systems (vgl. Schritt 106) sein.

Fig.2 zeigt eine schematische Skizze eines Recovery-Boilers. Nachfolgend wird anhand des Beispiels "Recovery-Boiler" ein Ausführungsbeispiel des oben beschriebenen Verfahrens veranschaulicht.

In der Papier- und Zellstoffindustrie werden zum Aufschluß von Zellstoff verschiedene Chemikalien sowie Wärme und Elektroenergie benötigt. Aus einer eingedeckten Prozeßablaufe (Schwarzlauge) lassen sich mit Hilfe des Recovery-Boilers die verwendeten Chemikalien und zusätzlich Wärmeenergie zurückgewinnen. Ein Grad für die Zurückgewinnung der

Chemikalien ist von entscheidender Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage.

Die Schwarzlauge wird in einem Schmelzbett 201 verbrannt.
5 Dabei bildet sich eine Alkalischmelze, die über eine Leitung 202 abfließt. Aus den Bestandteilen der Alkalischmelze werden in weiteren Verfahrensschritten die eingesetzten Chemikalien zurückgewonnen. Frei gewordene Verbrennungswärme wird zur Erzeugung von Wasserdampf genutzt. Die Verbrennung der
10 Ablauge und damit die Rückgewinnung der Chemikalien beginnt mit der Zerstäubung der Schwarzlauge über Zerstäuberdüsen 204 in eine Brennkammer 203. Partikel der zerstäubten Schwarzlauge werden bei ihrem Fall durch das heiße Rauchgas getrocknet. Die getrockneten Laugenpartikel fallen auf das
15 Schmelzbett 201, wobei eine erste Verbrennung und eine chemische Reduktion stattfinden. Flüchtige Bestandteile und Reaktionsprodukte gelangen in eine Oxidationszone, in der oxidierende Reaktionen ablaufen und in der die Verbrennung abgeschlossen wird.

20 Wichtige Zielvorgaben für die Steuerung des Recovery-Boilers sind die Dampfproduktion zur Energiegewinnung, die Einhaltung von Emissionswerten unter Umweltgesichtspunkten und die Effizienz der chemischen Reduktion.

25 Der Verbrennungsvorgang, und damit die Zielvorgaben, werden insbesondere durch die Luftzufuhr in drei Ebenen (Primary Air (PA), Secondary Air (SA), Tertiary Air (TA)) gesteuert. Der Gesamtprozeß unterliegt zahlreichen Einflüssen, die bei der
30 Modellierung zu berücksichtigen sind:

- a) Die Messung der Größen unterliegen oftmals starken Schwankungen;
- 35 b) Es existieren nicht gemessene und nicht meßbare Einflußgrößen;

c) Bei jeder Änderung der einstellbaren Parameter kommt es zu Einschwingvorgängen;

5 d) Die technische Anlage verschmutzt und wird in vorgegebenen Abständen gereinigt, wodurch im Systemverhalten jeweils ein zeitlicher Drift bewirkt wird.

Die gemessenen Größen des Gesamtprozesses werden in
10 Eingangsgrößen (vgl. **Fig.3**) und Ausgangsgrößen (vgl. **Fig.5**) unterteilt. Jede Minute werden Meßwerte abgespeichert. Vier der Eingangsgrößen sind gleichzeitig auch Stellgrößen (auch: einstellbare Parameter; vgl. **Fig.4**). Die Stellgrößen sind im wesentlichen als unabhängig voneinander einstellbare freie
15 Parameter des Gesamtprozesses anzusehen. Einige der anderen Eingangsgrößen sind von den Stellgrößen mehr oder minder abhängig. Gemäß einer Vorgabe sind beim Recovery-Boiler die Größen "BL Front Pressure" und "BL Back Pressure" stets gleich zu regeln. Die vier Stellgrößen (vgl. **Fig.4**) sind
20 vorzugsweise abzuspeichern als Stellgrößen (mit dem gewünschten, voreingestellten Wert) und als Eingangsgrößen (mit dem gemessenen, realen Wert).

Beim Recovery-Boiler besteht eine Problemstellung darin, in
25 Abhängigkeit von den einstellbaren Parametern bestimmte Zielvorgaben, die über gemessene Größen definiert werden, zu erfüllen. Hier wird eine dreistufige Vorgehensweise zur Lösung des Problems gewählt:

30 1. Die zu betrachtenden Zielvorgaben werden durch stochastische Methoden modelliert, wobei diese Modelle durch neue Messungen aktualisiert werden (datengetriebene, empirische Modellierung). Dabei ist es sinnvoll, nicht nur ein einziges Modell zu verwenden,
35 sondern globale Modelle für die Identifikation interessanter Gebiete in einem durch die Zielvorgaben bestimmten Parameterraum und lokale Modelle zur exakten

Berechnung optimaler Arbeitspunkte einzusetzen. Die verwendeten Modelle werden durch Gütemaße bewertet.

2. Falls die betrachteten Modelle aufgrund der Datenlage
5 nicht hinreichend genau sind (Gütemaße), werden gezielt
neue Arbeitspunkte zur Modellverbesserung ausgewertet
(Experimental Design). Ferner werden durch Verwendung
globaler stochastischer Optimierungsverfahren bzgl. der
10 Zielvorgaben attraktive Gebiete in Abhängigkeit vom
aktuellen globalen Modell identifiziert.

3. Für die lokale Optimierung werden lokale Modelle
konstruiert und die zur Verfügung stehenden Datensätze
gegebenenfalls gezielt erweitert (Experimental Design).
15

Bei den Zielvorgaben handelt es sich um physikalisch-
technische bzw. betriebswirtschaftliche Kriterien, die in der
Regel Randbedingungen und/oder Sicherheitsbedingungen
entsprechen müssen. Häufig sind mehrere dieser Kriterien
20 gleichzeitig zu betrachten. Die Verwendung eines
stochastischen Modells kann insbesondere dazu verwendet
werden, die zu optimierenden Zielgrößen und ihre Abhängigkeit
von den einzustellenden Parametern im Rechner zu simulieren.
Dies ist dann notwendig, wenn Messungen sehr kostenintensiv
25 bzw. sehr zeitaufwendig sind. Bei Sicherheitsanforderungen
können mögliche Gefahrensituationen vermieden werden.

Beim Recovery-Boiler ist eine Online-Optimierung, die auf
mehreren Daten basiert, notwendig, weil die physikalisch-
30 chemischen Prozesse nicht mit ausreichender Genauigkeit
quantitativ modelliert werden können und weil das Verhalten
der Anlage im Verlauf des Betriebs Schwankungen unterliegt.
Das Wissen über dieses Verhalten muß stetig durch gezielte
Wahl neuer Arbeitspunkte erweitert werden. Daher empfiehlt
35 sich im Rahmen der Online-Optimierung das bereits
beschriebene dreistufige Vorgehen der stochastischen
Modellierung und der mathematischen Optimierung.

BESCHREIBUNG DER EINGANGSGRÖSSEN

5 Die a Eingangsgrößen ($a \in \mathbb{N}$, \mathbb{N} : Menge der natürlichen Zahlen) sind im allgemeinen von n Stellgrößen $n \in \mathbb{N}$ und von Zufallseffekten abhängig. Sie können wie folgt beschrieben werden:

10 Es seien $(\Omega, \mathcal{S}, \mathcal{P})$ ein Wahrscheinlichkeitsraum und \mathcal{B}^v eine Borelsche σ -Algebra über \mathbb{R}^v (\mathbb{R} : Menge der reellen Zahlen) für jedes $v \in \mathbb{N}$. Die Eingangsgrößen werden über eine $\mathcal{B}^n \times \mathcal{S} - \mathcal{B}^a$ -meßbare Abbildung φ dargestellt:

$$15 \quad \varphi : \mathbb{R}^n \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^a \quad (1).$$

Die Definitionsmenge der Abbildung φ ist ein kartesisches Produkt zweier Mengen. Betrachtet man die jeweiligen Projektionen auf die Einzelmengen, so erhält man folgende
20 Abbildungen:

$$\varphi_x : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^a, \omega \rightarrow \varphi(x, \omega) \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n \quad (2),$$

$$\varphi^\omega : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^a, x \rightarrow \varphi(x, \omega) \quad \text{für alle } \omega \in \Omega \quad (3).$$

25 $\{\varphi_x; x \in \mathbb{R}^n\}$ ist ein stochastischer Prozeß mit einer Indexmenge \mathbb{R}^n und eine Abbildung φ^ω ist für jedes Ereignis $\omega \in \Omega$ ein Pfad dieses stochastischen Prozesses.

30 Beim Recovery-Boiler ist $n=4$ und $a=14$ (nach Elimination der Größe "BL Back Pressure").

Aufgrund der geforderten Meßbarkeit der Abbildung φ_x ist für jedes $x \in \mathbb{R}^n$ die Abbildung φ_x eine Zufallsvariable. Unter
35 geeigneten Zusatzvoraussetzungen können Erwartungswerte und

höhere Momente betrachtet werden. Dieser Zugang ermöglicht den Schritt von stochastischen Modellen zu deterministischen Optimierungsproblemen. Bei einem deterministischen Optimierungsproblem ist die Zielfunktion direkt mittels einer Variablen einstellbar, wohingegen die stochastische Größe die Zielfunktion beeinflusst, aber keine gezielte Einstellung ermöglicht.

10 BESCHREIBUNG DER AUSGANGSGRÖßEN

Das Prozeßmodell M des Recovery-Boilers wird als Funktion in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen und weiteren Zufallseffekten beschrieben. Dabei sei $(\Omega, \mathcal{S}, \mathcal{P})$ der obige Wahrscheinlichkeitsraum. Das Prozeßmodell M ist dann eine $\mathcal{B}^a \times \mathcal{S} - \mathcal{B}^b$ -meßbare Abbildung:

$$M : \mathbb{R}^a \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^b \quad (4),$$

20 wobei b die Anzahl der Ausgangsgrößen bezeichnet.

Da der Recovery-Boiler einem zyklischen zeitlichen Drift unterliegt (von Reinigungsphase zu Reinigungsphase), ist zudem eine Beschreibung mit einem Zeitparameter denkbar. Die Ausgangsgrößen lassen sich durch $\mathcal{B}^n \times \mathcal{S} - \mathcal{B}^b$ -meßbare Abbildungen ψ darstellen:

$$\psi : \mathbb{R}^n \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^b \quad (5),$$

$$30 \quad (x, \omega) \rightarrow M(\psi(x, \omega), \omega) \quad (6).$$

Betrachtet man die jeweiligen Projektionen auf die Einzelmengen der Definitionsmenge, so erhält man folgende Abbildungen

$$35 \quad \psi_x : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^b, \omega \rightarrow \psi(x, \omega) \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n \quad (7),$$

$$\psi^\omega: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^b, x \rightarrow \psi(x, \omega) \quad \text{für alle } \omega \in \Omega \quad (8).$$

- 5 $\{\psi_x; x \in \mathbb{R}^n\}$ ist ein stochastischer Prozeß mit einer Indexmenge \mathbb{R}^n und die Abbildung ψ^ω ist für jedes $\omega \in \Omega$ ein Pfad dieses stochastischen Prozesses.

Beim Recovery-Boiler ist $b=15$.

- 10 Die Tatsache, daß bei der Definition von ψ zwischen den verwendeten Ereignissen ω nicht unterschieden wird, bedeutet keine Einschränkung, da Ω als kartesisches Produkt aus einem Ω_1 und einem Ω_2 dargestellt werden kann. Die obige Darstellung umfaßt somit auch das Modell:

15

$$\psi: \mathbb{R}^n \times \Omega_1 \times \Omega_2 \rightarrow \mathbb{R}^b \quad (9),$$

$$(x, \omega_1, \omega_2) \rightarrow M(\varphi(x, \omega_1), \omega_2) \quad (10).$$

20

BESCHREIBUNG DER ZUR VERFÜGUNG STEHENDEN DATENSÄTZE

- Mit den Beschreibungen in den beiden vorangegangenen Abschnitten kann man die Eingangsgrößen und die Ausgangsgrößen gemeinsam zu Meßgrößen (=Meßdaten) Φ zusammenfassen.
- 25 Φ ist eine $\mathcal{B}^n \times \mathcal{S} - \mathcal{B}^m$ -meßbare Abbildung mit $m = a + b$ und

$$\Phi: \mathbb{R}^n \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^m \quad (11),$$

30 $(x, \omega) \rightarrow \begin{pmatrix} \varphi(x, \omega) \\ \psi(x, \omega) \end{pmatrix} \quad (12).$

Betrachtet man wieder die jeweiligen Projektionen auf die Einzelmengen der Definitionsmenge, so erhält man folgende Abbildungen:

$$\Phi_x: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^m, \omega \rightarrow \Phi(x, \omega) \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n \quad (13),$$

$$\Phi^\omega: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m, x \rightarrow \Phi(x, \omega) \quad \text{für alle } \omega \in \Omega \quad (14).$$

$\{\Phi_x; x \in \mathbb{R}^n\}$ ist ein stochastischer Prozeß mit einer Indexmenge \mathbb{R}^n und die Abbildung Φ^ω ist für jedes $\omega \in \Omega$ ein Pfad dieses stochastischen Prozesses.

10

Für jedes gewählte Stellgrößentupel x werden beim Recovery-Boiler viele Realisierungen von Φ_x ermittelt und abgespeichert, d.h. zu jedem $x_j \in \mathbb{R}^n$ werden zahlreiche Realisierungen

15

$$\Phi_{jk} := \Phi(x_j, \omega_{jk}) \quad (15)$$

mit $\omega_{jk} \in \Omega; k = 1, 2, \dots, v_j;$

20

$v_j \in \mathbb{N}; j = 1, 2, \dots, u; u \in \mathbb{N}$

betrachtet. Die gespeicherten Datensätze D_{jk} des Recovery-Boilers sind also $(n + m)$ -Tupel:

$$D_{jk} = \begin{pmatrix} x_j \\ \Phi_{jk} \end{pmatrix}, \quad k = 1, 2, \dots, v_j; j = 1, 2, \dots, u \quad (16).$$

25

Dabei wird $D_{j_1 k_1}$ vor $D_{j_2 k_2}$ abgespeichert, wenn

$$(j_1 < j_2) \vee ((j_1 = j_2) \wedge (k_1 < k_2))$$

30

gilt.

Da für jedes Stellgrößentupel x im allgemeinen mehrere Realisierungen von Φ_x vorliegen, bietet sich aufgrund der komplexen stochastischen Eigenschaften des zu betrachtenden Prozesses als erster Schritt der statistischen Datenanalyse eine Klasseneinteilung der Parameter durch Bildung arithmetischer Mittelwerte an. Zudem werden offensichtlich fehlerhafte Datensätze ausgesondert. Ein offensichtlich fehlerhafter Datensatz ist bspw. eine physikalisch unmögliche Messung, der insbesondere aufgrund einer vorgenommenen Einstellung real gar nicht vorkommen kann.

Vorgehensweise:

1. Datensätze, bei denen die Größe "BL Front Pressure" ungleich der Größe "BL Back Pressure" ist, werden aussortiert, da diese beiden Werte nach Vorgabe der Anlagensteuerung gleich sein müssen. Der Datenverlust ist sehr gering.
2. Die Datensätze werden auf Klassen aufgeteilt, in denen die vier Einstellparameter (PA, SA, TA, BL Front Pressure, siehe oben) zeitlich aufeinanderfolgend konstant sind, d.h. die j -te Klasse besteht aus den Datensätzen $D_{j\bullet}$.
3. Klassen, in denen sich weniger als 30 Datensätze befinden, werden ausgesondert, damit Einschwingvorgänge keinen großen Einfluß haben.
4. Für jede Klasse werden ein arithmetischer Mittelwert $\bar{\Phi}_j$ und eine empirische Standardabweichung s_j für alle Meßgrößen ermittelt:

$$\bar{\Phi}_j = \frac{1}{v_j} \cdot \sum_{k=1}^{v_j} \Phi_{jk} \quad (17),$$

17

$$s_j = \begin{pmatrix} \left(\frac{1}{v_j - 1} \cdot \sum_{k=1}^{v_j} (\Phi_{jk}^{(1)} - \bar{\Phi}_j^{(1)})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ \vdots \\ \left(\frac{1}{v_j - 1} \cdot \sum_{k=1}^{v_j} (\Phi_{jk}^{(m)} - \bar{\Phi}_j^{(m)})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \quad (18).$$

5. Klassen bei denen die Mittelwerte für die Größen PA, SA, TA oder BL Front Pressure zu weit von den entsprechenden Einstellparametern entfernt sind, werden ausgesondert. Auf diesen Klassen konnten also die Einstellwerte nicht erreicht werden.

10

STATISTISCHE KENNGRÖßEN FÜR DIE GEGEBENEN KLASSEN UND IHRE GRAPHISCHE DARSTELLUNG

- Neben den arithmetischen Mittelwerten und den empirischen Standardabweichungen, die für die einzelnen Klassen bestimmt wurden, wird noch eine gemeinsame Standardabweichung s bestimmt gemäß

$$s = \begin{pmatrix} \left(\frac{1}{v - 1} \cdot \sum_{j=1}^u (v_j - 1) s_j^{(1)2} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \vdots \\ \left(\frac{1}{v - 1} \cdot \sum_{j=1}^u (v_j - 1) s_j^{(m)2} \right)^{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \quad (19)$$

20

Dabei steht u für die Anzahl der Klassen (hier 205) und v für die Summe der v_j , d.h. v ist die Anzahl aller verwendeten Meßwerte (hier 38915).

LINEARE REGRESSIONSMODELLE FÜR FUNKTIONSNÄHERUNGEN

Für jede Meßgröße (Meßdatum) $\Phi^{(i)}$ ($i=1,2,\dots,m$) wird,
 5 basierend auf dem arithmetischen Mittel über die Klassen, ein
 lineares Regressionsmodell in Abhängigkeit von der
 quadratischen Kombination der vier Einstellparameter
 berechnet. In der folgenden Darstellung ist $x \in \mathbb{R}^4$, wobei

10 $x^{(1)}$: Primary Air (PA)

$x^{(2)}$: Secondary Air (SA)

15 $x^{(3)}$: Tertiary Air (TA)

$x^{(4)}$: Black Liquor (BL) Front Pressure

gilt. $u \in \mathbb{N}$ bezeichnet die Anzahl der Klassen. Jede Meßgröße
 20 $\Phi^{(i)}$ wird durch

$$\Phi^{(i)}(x, \omega) = a_i^T r(x) + e_i(\omega) \quad (20)$$

mit $a_i \in \mathbb{R}^{15}$ modelliert. Dabei gelten

25 $r: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^{15}$ (21)

$$(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4)^T \rightarrow (1, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \zeta_1^2, \zeta_2^2, \zeta_3^2, \zeta_4^2, \\ \zeta_1\zeta_2, \zeta_1\zeta_3, \zeta_1\zeta_4, \zeta_2\zeta_3, \zeta_2\zeta_4, \zeta_3\zeta_4)^T \quad (22),$$

30 d.h. Polynome zweiten Grades werden an die Meßdaten angepaßt,
 und

$$e_i: \Omega \rightarrow \mathbb{R} \quad (23)$$

35

ist eine Zufallsvariable mit Erwartungswert 0.

Der Vektor a_i wird mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt, allerdings werden statt der

5 Originaldatensätze $(x_j, \Phi_j^{(i)})^T$ die arithmetischen Mittel

$(x_j, \bar{\Phi}_j^{(i)})^T$ verwendet. Diese Vorgehensweise eignet sich, da durch lineare Regressionsmodelle insbesondere Erwartungswerte geschätzt werden. Somit erhält man das Minimierungsproblem:

$$10 \quad \min_{a_i \in \mathbb{R}^{15}} \left\{ \left\| \begin{pmatrix} \bar{\Phi}_1^{(i)} \\ \vdots \\ \bar{\Phi}_u^{(i)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r(x_1)^T \\ \vdots \\ r(x_u)^T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_i^{(1)} \\ \vdots \\ a_i^{(15)} \end{pmatrix} \right\|_2^2 \right\} \quad (24).$$

Es sei \bar{a}_i der optimale Punkt des quadratischen Minimierungsproblems aus Gleichung (24). Ferner gelte:

$$15 \quad \hat{y}_i := \begin{pmatrix} r(x_1)^T \\ \vdots \\ r(x_u)^T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{a}_i^{(1)} \\ \vdots \\ \bar{a}_i^{(15)} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^u \quad (25),$$

$$\bar{y}_i := \frac{1}{u} \cdot \sum_{j=1}^u \bar{\Phi}_j^{(i)} \in \mathbb{R} \quad (26).$$

Zur Validierung des Regressionsansatzes wird ein
20 Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet gemäß

$$R^2 := \frac{\sum_{j=1}^u \left(\hat{y}_i^{(j)} - \bar{y}_i \right)^2}{\sum_{j=1}^u \left(\bar{\Phi}_j^{(i)} - \bar{y}_i \right)^2} = \frac{\hat{y}_i^T \hat{y}_i - u \bar{y}_i^2}{\bar{\Phi}^{(i)T} \bar{\Phi}^{(i)} - u \bar{y}_i^2} \quad (27)$$

mit

$$\bar{\Phi}^{(i)} = \begin{pmatrix} \bar{\Phi}_1^{(i)} \\ \vdots \\ \bar{\Phi}_u^{(i)} \end{pmatrix} \quad (28).$$

Je näher R_i^2 bei 1 liegt, desto besser wird die abhängige Variable durch die unabhängigen Variablen dargestellt
 5 $(0 \leq R_i^2 \leq 1)$.

Zusätzlich wird ein Maximum $E_{\max}^{(i)}$ für einen Absolutwertes der Abweichung der Daten vom Modell angegeben als

$$10 \quad E_{\max}^{(i)} := \max_{j=1, \dots, u} \left\{ \left| \bar{\Phi}_j^{(i)} - \hat{y}_i^{(j)} \right| \right\} \quad (29).$$

$E_{90\%}^{(i)}$ ist derjenige Wert, unterhalb dessen mindestens 90% der Absolutwerte der Abweichungen der Daten vom Modell liegen. Analog dazu ist $E_{80\%}^{(i)}$ derjenige Wert, unterhalb dessen
 15 mindestens 80% der Absolutwerte der Abweichungen der Daten vom Modell liegen. Mit dem optimalen Punkt \bar{a}_i des Minimierungsproblems gemäß Gleichung (24) läßt sich ein Modell $\tilde{\Phi}^{(i)}$ des Erwartungswertes der Meßgröße $\Phi^{(i)}$ angeben zu

$$20 \quad \tilde{\Phi}^{(i)} := \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad (30),$$

$$x \rightarrow \bar{a}_i^T r(x) \quad (31).$$

Insbesondere läßt sich der Gradient $\nabla \tilde{\Phi}^{(i)}$ analytisch angeben
 25 mit

$$\nabla \tilde{\Phi}^{(i)}(x) = \frac{dr}{dx}(x) \cdot \bar{a}_i \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n \quad (32).$$

ALLGEMEINE VORGEHENSWEISE

Die Steuerung des Recovery-Boilers erfolgt durch einen
 5 Anlagen-Operator. Aufgrund von Vorgaben des Anlagen-
 Operators, ergibt sich eine Funktion

$$F : \mathbb{R}^n \times \Omega \rightarrow \mathbb{R} \quad (33),$$

$$10 \quad (x, \omega) \rightarrow g(\Phi(x, \omega), x) \quad (34).$$

In die Wahl der Funktion

$$g : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad (35),$$

$$15 \quad (\eta, x) \rightarrow g(\eta, x) \quad (36)$$

gehen die Vorgaben des Anlagen-Operators ein. Ein Ziel
 besteht in der globalen Minimierung des Erwartungswertes der
 20 Funktion F . Aufgrund der stochastischen Komplexität des
 beschriebenen Problems bietet sich eine dreistufige
 approximative Vorgehensweise an:

1. Mit Hilfe der oben dargestellten stochastischen
 25 Beschreibung der Meßdaten durchgeführten statistischen
 Datenanalyse und der daraus resultierenden Modelle $\tilde{\Phi}$ für
 den Erwartungswert von Φ , wird das folgende globale
 Modell \tilde{F} für den Erwartungswert der Funktion F bestimmt:

$$30 \quad \tilde{F} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad (37),$$

$$x \rightarrow g(\tilde{\Phi}(x), x) \quad (38).$$

Für konvexe Funktionen g kann man mit Hilfe der
 35 Jensenschen Ungleichung die folgende Beziehung angeben:

$$\tilde{F}(x) \leq E(F(x, \bullet)) \quad (39),$$

d.h. \tilde{F} approximiert den Erwartungswert von F von unten.
Das Symbol " \bullet " deutet an, daß die Zufallsvariable durch
5 die Beziehung $E(\dots)$ eliminiert wird.

2. Unter Verwendung des entwickelten globalen Modells können
Punkte in geeigneten Umgebungen globaler Minimierer von
 \tilde{F} durch stochastische Methoden zur globalen Minimierung
10 (siehe [1]) berechnet werden. Diese Punkte dienen als
Startpunkte für eine lokale Minimierung. Falls das
betrachtete globale Modell aufgrund der Datenlage nicht
hinreichend genau ist, also die Güte nicht ausreichen
hoch ist, werden gezielt neue Arbeitspunkte zur
15 Modellverbesserung ausgewertet (Experimental Design).
3. Für die lokale Minimierung ist das globale Modell \tilde{F}
eventuell nicht genau genug. Daher wird jeweils ein
lokales Modell des Erwartungswertes von F verwendet. Für
20 die Modellierung verwendet man wieder geeignete lineare
Regressionsmodelle, wobei jetzt bevorzugt Daten der
lokalen Umgebung eines aktuell betrachteten
Iterationspunktes berücksichtigt werden. Ist eine zu
geringe Menge lokalen Datenmaterials vorhanden, so wird
25 dieses Datenmaterial durch gezielte Auswertung neuer
Meßdaten (entsprechen Arbeitspunkten im Hinblick auf
einen von den Zielfunktionen aufgespannten Parameterraum)
geeignet erweitert (Experimental Design). Die zu
verwendenden Strategien zur gezielten Erweiterung des
30 Datenmaterials hängen unter anderem von den zur Wahl
stehenden lokalen Optimierungsverfahren ab. Als
Optimierungsverfahren kommen in Frage:
 - 3.1. Simplexgestützte Optimierungsprozeduren (siehe
[2]), die nur Zielfunktionswerte verwenden.
 - 35 3.2. Gradientengestützte Optimierungsprozeduren.
 - 3.3. Prozeduren, die basierend auf der Idee der simplex
gestützten Algorithmen zusätzlich

Gradienteninformation verwenden. Mit den erweiterten Daten kann somit der nächste lokale Optimierungsschritt ausgeführt werden (Online-Optimierung).

5

Durch Verwendung spezieller Kleinstquadratschätzer (etwa Kalman-Filter, siehe [3]) mit Ausreißeridentifikation können alle verwendeten Modelle online adaptiv verbessert werden.

10

Spezielle Fragestellungen können zu Vektoroptimierungsproblemen führen. Das Ziel der Anlagensteuerung wird dabei durch eine vektorwertige Funktion \hat{F} bestimmt:

$$15 \quad \hat{F} : \mathbb{R}^n \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d \quad (40),$$

$$(x, \omega) \rightarrow \hat{g}(\Phi(x, \omega), x) \quad (41)$$

mit einer zu wählenden vektorwertigen Funktion \hat{g} gemäß

20

$$\hat{g} : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^d \quad (42),$$

$$(\eta, x) \rightarrow \hat{g}(\eta, x) \quad (43).$$

25

Analog zu skalarwertigen Optimierungsproblemen können Vektoroptimierungsprobleme durch entsprechendes dreistufiges Vorgehen behandelt werden.

DEFINITION PROBLEMSPEZIFISCHER ZIELFUNKTIONEN
(Fall $d=1$)

In vorausgegangenen Abschnitt wurde die Struktur möglicher
5 Zielfunktionen beschrieben. Für konkrete Fragestellungen
müssen konkrete Funktionen g definiert werden. Eine mögliche
Wahl von g lautet wie folgt:

$$g : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad (44),$$

10

$$(\eta, x) \rightarrow (\eta - \hat{\eta})^T G_1 (\eta - \hat{\eta}) + (x - \hat{x})^T G_2 (x - \hat{x}) \quad (45),$$

wobei G_1 und G_2 positiv (semi-)definite Matrizen darstellen.
Diese Funktion wird folgendermaßen interpretiert:

15

1. Ein Vektor $\hat{\eta}$ beschreibt einen gewünschten Anlagezustand.
Gesucht ist ein Punkt x , für den die Anlage möglichst
genau den gewünschten Zustand annimmt. Dieser Vektor $\hat{\eta}$
wird vom Anlagen-Operator (in Form von Abweichungen vom
20 Ist-Zustand) vorgegeben, ist daneben aber auch
automatisch vorgebar.
2. Es gibt Anlagenzustände, die unter allen Umständen
vermieden werden müssen. Daher ist man darauf angewiesen,
25 Stellgrößen x zu wählen, die nicht zu weit von
unproblematischen Stellgrößen entfernt sind. In der
obigen Funktion wird eine spezielle unproblematische
Stellgröße \hat{x} berücksichtigt.
- 30 3. Zusätzliche Restriktionen können durch Straf-Terme
additiv in die Funktion g eingebracht werden. Ein
Beispiel hierfür lautet wie folgt:
Die Funktion g soll minimiert werden, wobei die
Nebenbedingungen

35

$$h(x) = 0 \text{ und } k(x) \leq 0$$

25

zu berücksichtigen sind. Dies erfolgt insbesondere durch Minimierung des folgenden Terms:

$$g + \mu_1 \cdot h^2(x) + \mu_2 \cdot k^4(x).$$

Literaturverzeichnis:

- [1] Stefan Schäffler: "Global Optimization Using Stochastic Integration", Theorie und Forschung: Mathematik, S. Roderer Verlag, Regensburg, 1995, Seiten 19-48.
- 5 [2] T. F. Sturm: Ein Quasi-Newton-Verfahren durch Hermite-Interpolation, Dissertation, Technische Universität München, 1991.
- [3] Gerald J. Bierman: "Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation", Mathematics in Science and
10 Engineering, Volumen 128, Academic Press, New York, 1977, Seiten 5-6.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems,
 - 5 a) bei dem Meßdaten eines vorgegebenen Systems anhand eines Ersatzmodells beschrieben werden;
 - b) bei dem eine Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells ermittelt wird;
 - 10 c) bei dem das Ersatzmodell dahingehend angepaßt wird, daß es eine möglichst hohe Maßzahl für die Güte aufweist;
 - 15 d) bei dem die Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells dadurch verbessert wird, daß zusätzliche Meßdaten des vorgegebenen Systems ermittelt werden;
 - 20 e) bei dem das hinsichtlich seiner Güte angepaßte Ersatzmodell zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
25 bei dem das Ersatzmodell ein Regressionsmodell ist.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
bei dem das Ersatzmodell für eine weitere Erhöhung der Maßzahl der Güte verfeinert wird, indem mindestens ein vorgebbarer Teilbereich des Ersatzmodell lokal angepaßt
30 wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
bei dem die zusätzlichen Meßdaten dort ermittelt werden, wo das Ersatzmodell nur unzureichend genau das
35 vorgegebene System abbildet.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
bei dem die Güte anhand einer quadratischen Abweichung
der Meßdaten von den durch das Ersatzmodell bestimmten
Daten ermittelt wird.
5
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
bei dem die Meßdaten nach deren Güte, bezogen auf deren
Abweichung von den durch das Ersatzmodell bestimmten
Daten, sortiert werden und eine vorgegebene Anzahl von $n\%$
10 schlechtesten Meßdaten aussortiert werden.
7. Verfahren nach Anspruch 6,
bei dem die $n\%$ schlechtesten Meßdaten nicht aussortiert
werden, wenn sie in einem zusammenhängenden Bereich
15 liegen.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
bei dem die Menge der Meßdaten im Rahmen einer
Vorverarbeitung reduziert wird.
20
9. Verfahren nach Anspruch 8,
bei dem die Vorverarbeitung eine Klasseneinteilung der
Meßdaten umfaßt.
- 25 10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
bei dem die mittels Entwurf gewonnenen Daten zur
Steuerung einer technischen Anlage eingesetzt werden.
11. Verfahren nach Anspruch 10,
30 zur Online-Anpassung der Steuerung für die technische
Anlage.
12. Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems,
35 mit eineressoreinheit, die derart eingerichtet ist,
daß

- a) Meßdaten eines vorgegebenen Systems anhand eines Ersatzmodells beschreibbar sind;
- 5 b) eine Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells ermittelbar ist, indem die Meßdaten des vorgegebenen Systems mit durch das Ersatzmodell bestimmten Daten verglichen werden;
- 10 c) aus der Maßzahl für die Güte das Ersatzmodell dahingehend anpaßbar ist, daß es eine möglichst hohe Güte aufweist;
- 15 d) die Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells dadurch verbesserbar sind, daß zusätzliche Meßdaten des vorgegebenen Systems ermittelt werden;
- e) das hinsichtlich seiner Güte angepaßte Ersatzmodell zum Entwurf des technischen Systems einsetzbar ist.

1/3

FIG 1

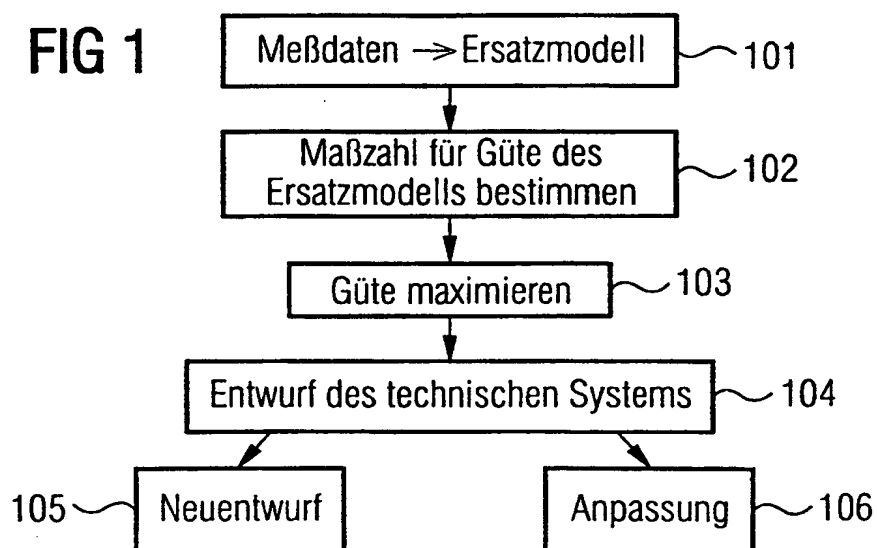
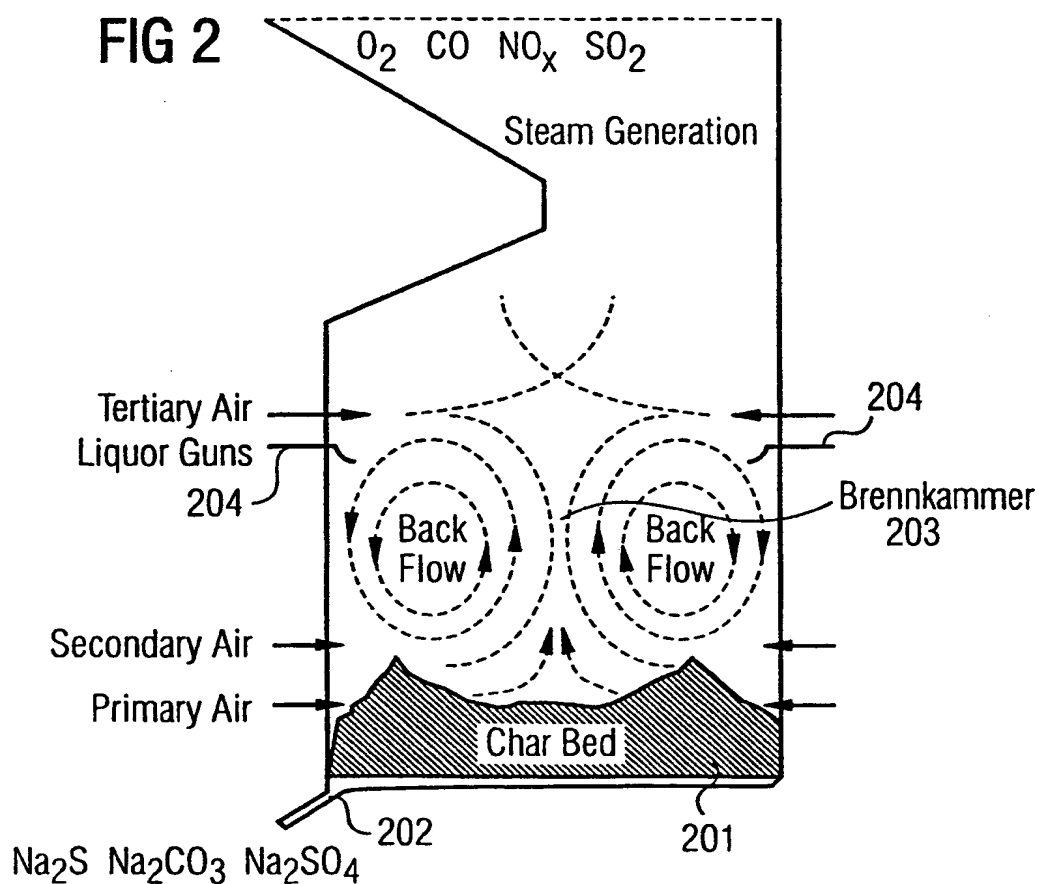


FIG 2



2/3

FIG 3

| Eingangsgrößen | | |
|----------------|------------|---------------------|
| | Meßgröße | Beschreibung |
| 1 | FI 7081 | BL Flow |
| 2 | QI 7082 A | Dry Solids Content |
| 3 | FIC 7280 X | PA Primary Air |
| 4 | FIC 7281 X | SA Secondary Air |
| 5 | FIC 7282 X | TA Tertiary Air |
| 6 | PI 7283 | PA Pressure |
| 7 | PI 7284 | SA Pressure |
| 8 | PHI 7285 | TA Pressure |
| 9 | TIC 7288 X | PA Temperature |
| 10 | TIC 7289 X | SA Temperature |
| 11 | PIC 7305 X | Press Induced Draft |
| 12 | HO 7338 | Oil Valve |
| 13 | TI 7347 | BL Temperature |
| 14 | PIC 7349 X | BL Front Pressure |
| 15 | PIC 7351 X | BL Back Pressure |

FIG 4

| Stellgrößen | | |
|-------------|------------|-------------------|
| | Meßgröße | Beschreibung |
| 1 | FIC 7280 X | PA Primary Air |
| 2 | FIC 7281 X | SA Secondary Air |
| 3 | FIC 7282 X | TA Tertiary Air |
| 4 | PIC 7349 X | BL Front Pressure |

3/3

FIG 5

| Ausgangsgrößen | | |
|----------------|------------|------------------------------|
| | Meßgröße | Beschreibung |
| 1 | TIC 7249 X | Steam Temperature |
| 2 | FI 7250 | Steam Production |
| 3 | QI 7322 | O_2 |
| 4 | TI 7323 | Smoke Temperature |
| 5 | QI 7331 | H_2S |
| 6 | QI 7332 | SO_2 |
| 7 | QIC 7333 X | CO |
| 8 | QIC 7370 X | Spec. Weight of Green Liquor |
| 9 | QI 7531 | NO |
| 10 | IBM 8096 | Reduction Efficiency |
| 11 | IBM 8109 | PH Value |
| 12 | TI 7352 | Bed Temperature |
| 13 | IBM 8015 | $NaOH$ |
| 14 | IBM 8016 | Na_2S |
| 15 | IBM 8017 | Na_2CO_3 |